



总装备部国防工业“十一五”规划教材

化工原理 实践指导

HUAGONG YUANLI SHIJIAN ZHIDAO

李同川 主编

本书看点：

1. 计算机模拟仿真实验验证；
2. 包含先进的分离技术讲解及验证；
3. 新技术在工程实际中的应用及验证；
4. 包含多种最先进的化工单元操作内容。



国防工业出版社
National Defense Industry Press

总装备部国防工业“十一五”规划教材

化工原理实践指导

李同川 主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书讲解了实验的基本知识以及化工原理多个基本单元操作,几乎涵盖化工原理各单元操作的内容,实验项目多达18个。并且多个实验项目(流体流动阻力的测定、洞道干燥、多功能精馏等)涉及自动化控制和计算机数据采集领域,适应多学科学生的需要。有多种最为先进的化工单元操作内容,如变压吸附、有机膜分离、无机膜分离、多功级精馏等。编入了先进的计算机化工仿真的实验内容,可以使读者掌握多种化工过程的计算机控制。

本书是实践性与工程性很强的教学指导书,既适用于化工、能源、冶金、纺织、环保、轻工、制药等相关专业高年级本科生的学习,也可作相关学科工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实践指导/李同川主编.—北京:国防工业出版社,2008.7

总装备部国防工业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-118-05807-9

I.化... II.李... III.化工原理—高等学校—教材 IV.TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 089076 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京诚信伟业印刷有限公司

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 9½ 字数 213 千字

2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 22.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

化工原理是一门实践性与工程性很强的技术基础课,是化工、能源、冶金、纺织、环保、轻工、制药等相关专业工程技术人员的重要技术基础。

化工原理课程包括理论教学、实验教学、课程设计和化工实习四个教学环节,其中实验教学是课程中的重要环节,是培养学生建立工程概念、掌握并实践理论知识不可缺少的环节。

通过实验,读者不但巩固了所学过的理论知识,而且还能在实验中增长不少新的知识,受到系统的、严格的工程实践训练,提高读者动手能力和分析问题、解决问题的能力。迄今为止,面对复杂的化工生产过程,不能只靠几个假定和定理,或者是演绎推导的方法便得到应用的理论。因此,不论是工程的可行性研究,新技术的开发和应用,或是工程设计的依据,往往都要依赖于以实验为基础的经验或半经验的公式或者直接取实验放大的数据。这就是为什么要求学生必须掌握实践技能的原因,教师和学生都要把这一点作为衡量教学质量的一个重要方面。

具体地讲,本课程应达到以下6个方面的教学要求。

- (1) 使学生掌握实验的基本技术和操作技能。
- (2) 使学生学会使用实验主要仪器和装备。
- (3) 使学生掌握实验研究的基本方法。
- (4) 培养学生动手与动脑、分析问题和解决问题的能力。
- (5) 培养学生理论联系实际、实事求是的学风。
- (6) 提高学生的自学能力、独立思考能力与创新能力。

本书的编写过程中,主要根据一般化工原理实验室教学设备的实际情况,并参考了清华大学、华东理工大学、天津大学等高校的相关书籍。本书包括基本单元操作实验、先进的分离技术实验、计算机仿真实验等。实验内容包括验证基础理论,使读者加深对理论的理解;着眼于新技术的应用,以提高读者对工程和工艺问题的认识。为了将现代化教育手段引入实验教学,还介绍了几个计算机仿真实验。

化工原理实验不同于理论教学,也有别于基础课程的实验。它具有更强的化学工程背景,实验流程较长,规模较大,学生需通过较为系统的实验室工作来培养自己的动手能力、分析问题的能力与创新思维,训练自己参加科学研究的能力。它要求读者有数理化和化工原理的理论基础,有物理、化学、电工、仪表等基本实验技能,通过本课程加强综合型实践训练。

本书由中北大学化工原理实验室的教师共同编写,各章节的编写人员如下:第1章、第2章、第3章:袁志国、霍红;第4章:袁志国;第5章:李同川、袁志国、李裕、张立新、焦

纬州、贾广信、王苏等；本实验指导书由李同川同志统稿并主审。在本书编写过程中，中北大学教务处实验设备科提供了很多帮助，使本书得以尽快成书，在此，对在编写过程中给予帮助和支持的同志表示衷心感谢。

由于本书编写时间仓促，加之作者水平有限，难免有不妥之处，衷心地希望读者给予指正。邮件地址：jtwang@ndip.cn

编著者
2008年6月

目 录

绪论	1
第 1 章 实验误差分析和数据处理	3
1.1 实验数据的误差分析	3
1.1.1 测量误差的基本概念	3
1.1.2 间接测量中的误差传递	9
1.1.3 实验数据的有效数据以及记数法	10
1.2 实验数据处理	11
1.2.1 列表法	11
1.2.2 图示法	12
1.2.3 实验数据数学方程表示法	15
第 2 章 计算机数据采集与控制	25
2.1 概述	25
2.2 计算机数据采集和控制的原理及构成	25
2.2.1 采集和控制系统各部件的主要功能	26
2.2.2 采集和控制示例	26
2.3 智能仪表	27
2.3.1 智能仪表的结构和工作方式	27
2.3.2 智能仪表的主要优点	28
2.3.3 AI 人工智能工业调节器	28
2.4 变频器	29
2.4.1 变频器的主要特点	30
2.4.2 变频器的使用方法及注意事项	30
第 3 章 正交试验设计方法	31
3.1 试验设计方法概述	31
3.2 正交试验设计方法的优点和特点	32
3.3 正交表	33
3.3.1 各列水平数均相同的正交表	33
3.3.2 混合水平正交表	34

3.3.3	选择正交表的基本原则	34
3.3.4	正交表的表头设计	34
3.4	正交试验的操作方法	35
3.5	正交试验结果分析方法	36
3.5.1	极差分析方法	36
3.5.2	方差分析方法	37
3.6	正交试验方法在化工原理实验中的应用举例	37
第4章	仿真实验软件界面操作方法及操作要点	41
4.1	智能控制(IPC)模式操作法	41
4.1.1	概述	41
4.1.2	画面中主要操作与显示位图说明	43
4.1.3	流程图画面	45
4.1.4	控制组画面	46
4.1.5	趋势组画面	46
4.1.6	报警组画面	46
4.1.7	指示组画面	47
4.1.8	帮助画面	47
4.1.9	评分记录画面	48
4.1.10	随机存入工况文件画面	48
4.1.11	随机读取历史工况文件画面	49
4.1.12	报警音响控制	50
4.2	化工单元过程操作要点	50
4.3	控制系统操作要点	58
4.3.1	调节器操作要点	58
4.3.2	串级调节的操作要点	58
4.3.3	复杂控制系统	59
第5章	实验	60
实验一	流体流动阻力的测定	60
实验二	流量计的校正	63
实验三	离心泵特性曲线的测定	67
实验四	换热器传热系数的测定	71
实验五	筛板塔精馏实验	74
实验六	填料塔中气相传质系数的测定	78
实验七	过滤实验	83
实验八	洞道干燥及计算机控制实验	87

实验九 无机陶瓷膜分离实验	91
实验十 有机膜过滤水实验	94
实验十一 离心泵及液位的仿真实验	97
实验十二 液-液萃取实验	103
实验十三 变压吸附	107
实验十四 萃取精馏实验	111
实验十五 流化床干燥实验	114
实验十六 离心风机特性曲线的测定	118
实验十七 伯努利与雷诺实验	121
(一)伯努利实验	121
(二)雷诺实验	123
实验十八 精馏系统仿真实验	126
附录一 液体比重天平使用说明	136
附录二 常压下乙醇水溶液的汽、液平衡数据(表 A2-1)	138
附录三 阿贝折射仪	139
附录四 乙醇水溶液的比重、折光率(表 A4-1)	140
附录五 氨的亨利系数	141
附录六 尾气分析方法	142
附录七 湿式气体流量计的使用方法	143
参考文献	144

绪 论

化工原理是研究化工生产过程中各种单元操作的工程学科。它紧密联系生产实际,是石油、化工、轻工等专业学生必修的一门专业基础课程。化工原理实验是学习、掌握化工原理课程必不可少的重要教学环节,与一般化学实验相比,不同之处在于它具有工程特点。

1. 化工原理实验的教学目的

1) 巩固和深化理论知识

化工原理课程中所讲授的理论、概念或公式,学生对它们的理解往往还不深刻,当学生做了化工原理实验后,对于基本原理的理解、公式中各种参数的来源以及使用范围会有更深入的认识。

2) 培养学生从事实验研究的能力

理工科高等院校的毕业生,必须具备一定的实验研究能力。实验能力主要包括:为了完成一定的研究课题,设计实验方案的能力;进行实验、观察和分析实验现象的能力;正确选择和使用测量仪表的能力;利用实验的原始数据进行数据处理以获得实验结果的能力;运用文字表达技术报告的能力。这些能力是进行科学研究的基础,学生只有通过一定数量的基础实验与综合实验练习,经过反复训练才能掌握各种实验能力。

3) 培养学生实事求是、严肃认真的学习态度

实验研究是实践性很强的工作,对从事实验者的要求是很高的,化工原理实验课要求学生具有一丝不苟的工作作风和严肃认真的工作态度,从实验操作、现象观察到数据处理等各个环节都不能丝毫马虎,如果粗心大意,敷衍了事,轻则实验数据不好,得不出什么结论,重则会造成设备损坏或人身事故。

总之实验教学对于学生的培养是不容忽视的,对学生动手和解决实际问题能力的锻炼是书本无法代替的。化工原理实验教学对于化工专业的学生来说仅仅是工程实践教学的开始,在高年级的专业实验和毕业论文阶段还要继续提高。

2. 化工原理实验的教学要求

化工原理实验对于学生来说是第一次接触到用工程装置进行实验,学生往往感到陌生,无从下手,有的学生又因为是几个人一组而有依赖心理,为了切实收到教学效果,要求每个学生必须做到以下几点。

1) 实验前的预习

学生实验前必须认真地预习实验指导书,清楚地了解实验目的、要求、原理及实验步骤,才能顺利完成实验任务。

实验开始首先要考虑如下问题:准备开始哪个实验,了解实验目的,弄清楚本次实验的基本原理,采用的是什么装置,要弄清装置的原理和构造、看清流程、了解启动和使用方法,选用什么物系,也要考虑实验要如何布点和实验数据的读取,做好记录数据的表格。

并预期可能出现的故障及其克服的办法等。

2) 怎样做好实验

实验要求学生正确使用设备,仔细观察现象,详细地记录数据。读取数据时应注意:

(1) 凡是影响实验结果或者数据整理过程中所必需的数据都一定测取。它包括大气条件,设备有关尺寸,物料性质及操作数据等。

(2) 不是所有的数据都要直接测取。凡可以根据某一数据导出或从手册中查取的数据,不必直接测定。例如:水的黏度、重度等物理性质,一般只要测出水温,即可查出,不必直接测定。

(3) 实验时须在现象稳定后才读数据。条件改变,要待稳定后才可读数。

(4) 同一条件下,至少要读取两次数据(研究不稳定过程除外)。在两次数据相近时,方可改变操作条件。每个数据在记录后都必须复核,以防读错或记错。

(5) 根据仪表的精确度,正确地读取有效数字。必须记录直读的数据,而不是通过换算或演算以后的数据。读取的数据必须真实地反映客观实际,即使已经发现它是不合理的数据,也要如实地记录下来,待讨论实验结果时进行分析讨论。这样做,对我们分析问题以及核实情况有利。

3) 其他注意事项

实验过程中,除了读取数据外,还应做好下列各项。

(1) 操作者必须密切注意仪表指示的值的变动,随时调节,务必使整个操作过程都在规定条件下进行,尽量减少实验操作条件和规定操作条件之间的差距。操作人员不得擅自离岗位。

(2) 读取数据以后,应立即和前次数据相比较,也要和其他有关数据相对照,分析相互关系是否合理。如果发现不合理的情况,应该立即同本组同学研究原因,以便及时发现问题、解决问题。

(3) 实验过程中还应注意观察过程现象,特别是发现某些不正常现象时更应抓紧时机,研究产生不正常现象的原因。

学生做实验必须经历:预习——写出预习报告——实际操作——数据处理——交付实验报告等学习步骤。

4) 怎样编写实验报告

实验报告是实验工作的总结,编写报告是对学生能力的训练。因此,学生应独立地完成实验报告。实验报告要求文字简明,说理充分,计算正确,图表清晰而且有分析讨论。实验报告通常包含以下内容:

- (1) 报告人的班号、姓名、学号及合作者的姓名;
- (2) 实验名称;
- (3) 数据处理公式;
- (4) 计算举例,即列出其中一组数据的计算示例;
- (5) 实验结果;
- (6) 分析讨论。

第1章 实验误差分析和数据处理

1.1 实验数据的误差分析

通过实验测量所得的大批数据是实验的初步结果,但在实验中由于测量仪表和人的观察等方面的原因,实验数据总存在一些误差。而误差的存在是必然的,具有普遍性。因此,研究误差的来源及其规律性,尽可能地减小误差,以得到准确的实验结果,对于寻找事物的规律,发现可能存在的新现象是非常重要的。

误差估算与分析的目的就是评定实验数据的准确性,通过误差估算与分析,可以认清误差的来源及其影响,确定导致实验总误差的最大组成因素,从而在准备实验方案和研究过程中,有的放矢地集中精力消除或减小产生误差的来源,提高实验的质量。

目前对误差应用和理论发展日益深入和扩展,涉及内容非常广泛,本章只就化工基础实验中常遇到的一些误差基本概念与估算方法作一简要讲解。

1.1.1 测量误差的基本概念

1. 实验数据的测量

科学实验总是和测量紧密联系,这里主要讨论恒定的静态测量,一般把它分为两大类。可以用仪器、仪表直接读出数据的测量叫**直接测量**。例如:用米尺测量长度,用秒表计时间,用温度计、压力表测量温度和压力等。凡是基于直接测量值得出的数据再按一定函数关系式,通过计算才能求得测量结果的测量称为**间接测量**。例如:测定圆柱体体积时,先测量直径 D 和高度 H ,再用公式 $V = \pi D^2 H / 4$,计算出体积 V , V 就属于间接测量的物理量。化工基础实验中多数测量均属间接测量。

2. 实验数据的真值和平均值

1) 真值

真值是指某物理量客观存在的确定值。对它进行测量时,由于测量仪器、测量方法、环境、人员及测量程序等都不可能完美无缺,实验误差难于避免,故真值是无法测得的,是一个理想值。在分析实验测定误差时,一般用如下方法替代真值:

(1) **实际值** 是现实中可以知道的一个量值,用它可以替代真值。如理论上证实的值,像平面三角形内角之和为 180° ;又如计量学中经国际计量大会决议的值,像热力学温度单位绝对零度等于 -273.15K ;或将准确度高一级的测量仪器所测得的值视为真值。

(2) **平均值** 是指对某物理量经多次测量算出的平均结果,用它替代真值。当然测量次数无限多时,算出的平均值应该是很接近真值的,实际上测量次数是有限的(比如 10 次),所得的平均值只能说是近似地接近真值。

2) 平均值

在化工领域中,常用的平均值有下面几种:

(1) **算术平均值** 此平均值最常用。设 x_1, x_2, \dots, x_n 代表各次的测量值, n 代表测量次数, 则算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1-1)$$

凡测量值的分布服从正态分布时, 用最小二乘法原理可证明: 在一组等精度的测量值中, 算术平均值为最佳值或最可信赖值。

(2) **均方根平均值** 此平均值常用于计算气体分子的平均动能, 其定义式为

$$\bar{x}_{\text{均}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (1-2)$$

(3) **几何平均值** 此平均值的定义为

$$\bar{x}_{\text{几}} = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n} \quad (1-3)$$

以对数表示为

$$\lg \bar{x}_{\text{几}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lg x_i}{n} \quad (1-4)$$

对一组测量值取对数, 所得图形的分布曲线呈对称时, 常用几何平均值。可见, 几何平均值的对数等于这些测量值 x_i 的对数的算术平均值。几何平均值常小于算术平均值。

(4) **对数平均值** 在化学反应、热量与质量传递中, 分布曲线多具有对数特性, 此时可采用对数平均值表示量的平均值。

设有两个量 x_1, x_2 , 其对数平均值为

$$\bar{x}_{\text{对}} = \frac{x_1 - x_2}{\ln x_1 - \ln x_2} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (1-5)$$

两个量的对数平均值总小于算术平均值。若 $1 < \frac{x_1}{x_2} < 2$ 时, 可用算术平均值代替对数平均值, 引起的误差不超过 4.4%。

以上所介绍的各种平均值, 都是不同场合想从一组测量值中找出最接近于真值的量值。平均值的选择主要取决于测量值的分布类型, 在化工实验和科学研究中, 数据的分布一般为正态分布, 故常采用算术平均值。

3. 精密度、正确度和精确度(准确度)

测量的质量和水平, 可用误差的概念描述, 也可用准确度等概念描述。国内外文献所用的名词术语颇不统一, 精密度、正确度、精确度这几个术语的使用一向比较混乱。近年来趋于一致的多数意见如下:

精密度: 指衡量某些物理量几次测量之间的一致性, 即重复性。它可以反映偶然误差大小的影响程度。

正确度: 指在规定条件下, 测量中所有系统误差的综合。它可以反映系统误差大小的

影响程度。

精确度(准确度):指测量结果与真值偏离的程度。它可以反映系统误差和随机误差综合大小的影响程度。

为说明它们间的区别,可以用打靶作比喻。如图 1-1 所示,A 的系统误差小而偶然误差大,即正确度高而精密度低;B 的系统误差大而偶然误差小,即正确度低而精密度高;C 的系统误差和偶然误差都小,表示精确度(准确度)高。当然实验测量中没有像靶心那样明确的真值,而是设法去测定这个未知的真值。

对于实验测量来说,精密度高,正确度不一定高。正确度高,精密度也不一定高。但精确度(准确度)高,必然是精密度与正确度都高。

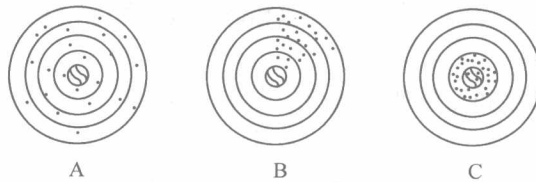


图 1-1 精密度、正确度、精确度含义示意图

4. 误差的定义及分类

1) 误差的定义

误差是实验测量值(包括直接和间接测量值)与真值(客观存在的准确值)之差。误差的大小,表示每一次测得值相对于真值不符合的程度。误差有以下含义:

(1) 误差永远不等于零。不管人们主观愿望如何,也不管人们在测量过程中怎样精心细致地控制,误差还是要产生的,不会消除,误差的存在是绝对的。

(2) 误差具有随机性。在相同的实验条件下,对同一个研究对象反复进行多次的实验、测试或观察,所得到的均不是一个确定的结果,即实验结果具有不确定性。

(3) 误差是未知的。通常情况下,由于真值是未知的。研究误差时,一般从偏差入手。

2) 误差的分类

根据误差的性质及产生的原因,可将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三种。

(1) **系统误差** 由某些固定不变的因素引起的。在相同条件下进行多次测量,其误差数值的大小和正负保持恒定,或误差随条件改变按一定规律变化。即有的系统误差随时间呈线性、非线性或周期性变化,有的不随测量时间变化。

产生系统误差的原因有:

① 测量仪器方面的因素(仪器设计上的缺点,零件制造不标准,安装不正确,未经校准等)。

② 环境因素(外界温度、湿度及压力变化引起的误差)。

③ 测量方法因素(近似的测量方法或近似的计算公式等引起的误差)。

④ 测量人员的习惯偏向等。

总之,系统误差有固定的偏向和确定的规律,一般可按具体原因采取相应措施给以校正或用修正公式加以消除。

(2) **随机误差** 由某些不易控制的因素造成。在相同条件下作多次测量,其误差数

值和符号是不确定的,即时大时小,时正时负,无固定大小和偏向。随机误差服从统计规律,其误差与测量次数有关。随着测量次数的增加,平均值的随机误差可以减小,但不会消除。因此,多次测量值的算术平均值接近于真值。研究随机误差可采用概率统计方法。

(3) **粗大误差** 与实际明显不符的误差,主要是由于实验人员粗心大意,如读数错误,记录错误或操作失败所致。这类误差往往与正常值相差很大,应在整理数据时依据常用的准则加以剔除。

注意:上述三种误差之间,在一定条件下可以相互转化。

例如:尺子刻度划分有误差,对制造尺子者来说是随机误差;一旦用它进行测量时,该尺子的分度对测量结果将形成系统误差。随机误差和系统误差间并不存在绝对的界限。同样,对于粗大误差,有时也难以和随机误差相区别,从而当作随机误差来处理。

5. 误差的表示方法

测量误差分为测量点和测量列(集合)的误差。它们有不同的表示方法:

1) 测量点的误差表示

(1) **绝对误差 D** 测量集中某次测量值与其真值之差的绝对值称为绝对误差:

$$D = |X - x| \quad (1-6)$$

即

$$X - x = \pm D \quad x - D \leq X \leq x + D$$

式中 X ——真值,常用多次测量的平均值代替;

x ——测量集中某测量值。

(2) **相对误差 E_r** 绝对误差与真值之比称为相对误差:

$$E_r = \frac{D}{|X|} \quad (1-7)$$

相对误差常用百分数或千分数表示。因此不同物理量的相对误差可以互相比较,相对误差与被测量的大小及绝对误差的数值都有关系。

(3) **引用误差** 仪表量程内最大示值误差与满量程示值之比的百分值。引用误差常用来表示仪表的精度。

2) 测量列(集合)的误差表示

(1) **范围误差** 范围误差是指一组测量中的最高值与最低值之差,以此作为误差变化的范围。使用中常应用误差的系数的概念。

$$K = \frac{L}{\alpha} \quad (1-8)$$

式中 K ——最大误差系数;

L ——范围误差;

α ——算术平均值。

范围误差最大缺点是使 K 只取决于两极端值。而与测量次数无关。

(2) **算术平均误差** 算术平均误差是表示误差的较好方法,其定义为

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (1-9)$$

式中 n ——观测次数;

d_i ——测量值与平均值的偏差, $d_i = x_i - \bar{x}$ 。

算术平均误差的缺点是无法表示出各次测量间彼此符合的情况。

(3) 标准误差 标准误差也称为根误差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (1-10)$$

标准误差对一组测量中的较大误差或较小误差感觉比较灵敏,成为表示精确度的较好方法。式(1-10)适用无限次测量的场合。实际测量中,测量次数是有限的,改写为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}} \quad (1-11)$$

标准误差不是一个具体的误差, σ 的大小只说明在一定条件下等精度测量集合所属的任一次观察值对其算术平均值的分散程度,如果 σ 的值小,说明该测量集合中相应小的误差就占优势,任一次观测值对其算术平均值的分散度就小,测量的可靠性就大。

算术平均误差和标准误差的计算式中第 i 次误差可分别代入绝对误差和相对误差,相对得到的值表示测量集合的绝对误差和相对误差。

上述的各种误差表示方法中,不论是比较各种测量的精度或是评定测量结果的质量,均以相对误差和标准误差表示为佳,而在文献中标准误差更常被采用。

6. 仪表的精确度与测量值的误差

1) 电工仪表等一些仪表的精确度与测量误差

这些仪表的精确度常采用仪表的最大引用误差和精确度的等级来表示。仪表的最大引用误差的定义为

$$\text{最大引用误差} = \frac{\text{仪表显示值的绝对误差}}{\text{该仪表相应挡次量程的绝对值}} \times 100\% \quad (1-12)$$

式中,仪表显示值的绝对误差指在规定的正常情况下,被测参数的测量值与被测参数的标准值之差的绝对值的最大值。对于多挡仪表,不同挡次显示值的绝对误差和量程范围均不相同。式(1-12)表明,若仪表显示值的绝对误差相同,则量程范围愈大,最大引用误差愈小。

我国电工仪表的精确度等级有 7 种:0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0。如某仪表的精确度等级为 2.5 级,则说明此仪表的最大引用误差为 2.5%。

在使用仪表时,如何估算某一次测量值的绝对误差和相对误差?

设仪表的精确度等级 P 级,其最大引用误差为 10%。设仪表的测量范围为 x_n ,仪表的示值为 x_i ,则由式(1-12)得该示值的误差为

$$\begin{aligned} \text{绝对误差} \quad D &\leq x_n \times P\% \\ \text{相对误差} \quad E &= \frac{D}{x_i} \leq \frac{x_n}{x_i} \times P\% \end{aligned} \quad (1-13)$$

式(1-13)表明:

(1) 若仪表的精确度等级 P 和测量范围 x_n 已固定,则测量的示值 x_i 愈大,测量的相

对误差愈小。

(2) 选用仪表时,不能盲目地追求仪表的精确度等级。因为测量的相对误差还与 x_n/x_i 有关。应该对仪表的精确度等级和 x_n/x_i 两者兼顾。

2) 天平类仪器的精确度和测量误差

这些仪器的精度用以下公式表示:

$$\text{仪器的精密度} = \frac{\text{名义分度值}}{\text{量程的范围}} \quad (1-14)$$

式中,名义分度值指测量时读数有把握正确的最小分度单位,即每个最小分度所代表的数值。例如: TG-3284 型天平,其名义分度值(感量)为 0.1mg,测量范围为 0~200g,则其

$$\text{精确度} = \frac{0.1}{(200-0) \times 10^3} = 5 \times 10^{-7} \quad (1-15)$$

若仪器的精确度已知,也可用式(1-14)求得其名义分度值。

使用这些仪器时,测量的误差可用下式确定:

$$\begin{aligned} \text{绝对误差} &\leq \text{名义分度值} \\ \text{相对误差} &\leq \frac{\text{名义分度值}}{\text{测量值}} \end{aligned} \quad (1-16)$$

3) 测量值的实际误差

由于仪表的精确度用上述方法所确定的测量误差,一般总是比测量值的实际误差小得多。这是因为仪器没有调整到理想状态,如不垂直、不水平、零位没有调整好等,会引起误差;仪表的实际工作条件不符合规定的正常工作条件,会引起附加误差;仪器经过长期使用后,零件发生磨损,装配状况发生变化等,也会引起误差;可能存在有操作者的习惯和偏向所引起的误差;仪表所感受的信号实际上可能并不等于待测的信号;仪表电路可能会受到干扰等。

总之,测量值实际误差大小的影响因素是很多的。为了获得较准确的测量结果,需要有较好的仪器,也需要有科学的态度和方法,以及扎实的理论知识和实践经验。

7. “过失”误差的舍弃

这里加引号的“过失”误差与前面提到真正的过失误差是不同的,在稳定过程,不受任何人为因素影响,测量出少量过大或过小的数值,随意地舍弃这些“坏值”,以获得实验结果的一致,这是一种错误的做法,“坏值”的舍弃要有理论依据。

如何判断是否属于异常值?最简单的方法是以 3 倍标准误差为依据。从概率的理论可知,大于 3σ (均方根误差)的误差所出现的概率只有 0.3%,故通常把这一数值称为极限误差,即

$$\delta_{\text{极限}} = 3\sigma \quad (1-17)$$

如果个别测量的误差超过 3σ ,那么就可以认为属于过失误差而将其舍弃。重要的是如何从有限的几次观察值中舍弃可疑值的问题,因为测量次数少,概率理论已不适用,而个别失常测量值对算术平均值影响很大。

有一种简单的判断法,即略去可疑观测值后,计算其余各观测值的平均值 α 及平均误差 δ ,然后算出可疑观测值 x_i 与平均值 α 的偏差 d ,若 $d \geq 4$,则此可疑值可以舍弃,因为这种观测值存在的概率大约只有 1/1000。

1.1.2 间接测量中的误差传递

在许多实验和研究中,所得到的结果有时不是用仪器直接测量得到的,而是要把实验现场直接测量值代入一定的理论关系式中,通过计算才能求得所需要的结果,即间接测量值。由于直接测量值总有一定的误差,因此它们必然引起间接测量值也有一定的误差,也就是说直接测量误差不可避免地传递到间接测量值中去,而产生间接测量误差。

由数学知识知道,当间接测量值 y 与直接值测量值 (x_1, x_2, \dots, x_n) 有函数关系时,即

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

则其微分式为

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n \quad (1-18)$$

$$\frac{dy}{y} = \frac{1}{f(x_1, x_2, \dots, x_n)} \left[\frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} dx_n \right] \quad (1-19)$$

根据式(1-18)和式(1-19),当直接测量值的误差 $(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n)$ 很小,并且考虑到最不利的情况,应是误差累积和取绝对值,则可求间接测量值的误差 Δy 或 $\Delta y/y$ 为

$$\Delta y = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \cdot |\Delta x_1| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \cdot |\Delta x_2| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \right| \cdot |\Delta x_n| \quad (1-20)$$

$$E_r = \frac{\Delta y}{y} = \frac{1}{f(x_1, x_2, \dots, x_n)} \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \cdot |\Delta x_1| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \cdot |\Delta x_2| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \right| \cdot |\Delta x_n| \quad (1-21)$$

这两个式子就是由直接测量误差计算间接测量误差的误差传递公式。对于标准差的传递则有:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 \sigma_{x_n}^2} \quad (1-22)$$

式中 $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}$ ——直接测量的标准误差;

σ_y ——间接测量值的标准误差。

上式在有关资料中称之为“几何合成”或“极限相对误差”。计算函数的误差的各种关系式见表 1-1 函数式的误差关系。

表 1-1 函数式的误差关系

数学式	误差传递公式	
	最大绝对误差	最大相对误差 $E_r(y)$
$y = x_1 + x_2 + \dots + x_n$	$\Delta y = \pm (\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n)$	$E_r(y) = \frac{\Delta y}{y}$
$y = x_1 + x_2$	$\Delta y = \pm (\Delta x_1 + \Delta x_2)$	$E_r(y) = \frac{\Delta y}{y}$
$y = x_1 \cdot x_2$	$\Delta y = \Delta(x_1 \cdot x_2) =$ $\pm (x_1 \cdot \Delta x_2 + x_2 \cdot \Delta x_1)$ 或 $\Delta y = y \cdot E_r(y)$	$E_r(y) = E_r(x_1 \cdot x_2) =$ $\pm \left(\left \frac{\Delta x_1}{x_1} \right + \left \frac{\Delta x_2}{x_2} \right \right)$